



EXPANSÃO DA GERAÇÃO

Solar Fotovoltaica Flutuante

*Aspectos Tecnológicos e Ambientais
relevantes ao Planejamento*

Fevereiro de 2020

Imagens da Capa:

Fotografias da usina solar flutuante sobre o
reservatório da UHE Sobradinho

Autor: André Viola Barreto



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME/SPE

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Bento Albuquerque

Secretário-Executivo do MME

Marisete Fátima Dadald Pereira

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Reive Barros

Secretário de Energia Elétrica

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Renata Beckert Isfer

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Alexandre Vidigal de Oliveira



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Erik Eduardo Rego

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível

José Mauro Ferreira Coelho

Diretor de Gestão Corporativa

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira (interino)

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

Esplanada dos Ministérios Bloco "U" Sala 744
CEP: 70.065-900 - Brasília - DF

Escritório Central

Av. Rio Branco, 01 – 11º Andar
20090-003 - Rio de Janeiro – RJ

EXPANSÃO DA GERAÇÃO

Solar Fotovoltaica Flutuante

Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao Planejamento

Coordenação Geral

Erik Eduardo Rego
Giovani Vitória Machado

Coordenação Executiva

Bernardo Folly de Aguiar
Cristina Maria Vasconcelos Falcão
Elisângela Medeiros de Almeida

Equipe Técnica

Alexandre Santucci Breves Oliveira
Aline Couto de Amorim
André Viola
Cristiano Saboia Ruschel
Daniel Dias Loureiro
Fernanda Corrêa Ferreira
Gabriel Konzen
Glauce Maria Lieggio Botelho
Gustavo Pires da Ponte
Leyla Silva
Leonardo Lopes
Luisa Domingues Ferreira Alves
Michele Almeida de Souza
Thiago Ivanoski Teixeira
Wladimir Soares de Brito Filho

Nº. EPE-DEE-NT-016/2020-r0

Data: 19 de Fevereiro de 2020

IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO E REVISÕES

| | | |
|---|------------------------|--------------------------|
|  Empresa de Pesquisa Energética | | |
| <i>Área de Estudo</i> EXPANSÃO DA GERAÇÃO | | |
| <i>Estudo</i> SOLAR FOTOVOLTAICA FLUTUANTE | | |
| <i>Macro atividade</i> Aspectos Tecnológicos e Ambientais Relevantes ao Planejamento | | |
| <i>Ref. Interna (se aplicável)</i> | | |
| <i>Revisões</i> | <i>Data de emissão</i> | <i>Descrição sucinta</i> |
| r0 | 19/02/2020 | Emissão original |

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 6 |
| 2. DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA | 7 |
| 3. POTENCIAIS BENEFÍCIOS E DESAFIOS | 12 |
| 4. DADOS INTERNACIONAIS E PROJETOS NO BRASIL..... | 20 |
| 4.1. Aproveitamento no Brasil..... | 23 |
| 5. CUSTOS DE INVESTIMENTO E DE OPERAÇÃO..... | 25 |
| 6. LICENCIAMENTO AMBIENTAL..... | 28 |
| 7. ASPECTOS JURÍDICOS E DIREITO DE USO DO LOCAL | 29 |
| 8. CONCLUSÕES..... | 33 |
| REFERÊNCIAS..... | 35 |

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A evolução tecnológica e a redução e custos dos módulos fotovoltaicos ao longo dos últimos anos permitiram um crescimento exponencial da fonte solar fotovoltaica no mundo.

O Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2029 (MME; EPE, 2019) indica que a expansão prevista da fonte solar fotovoltaica (FV) centralizada no horizonte é de 7 GW, superando 10 GW de capacidade instalada ao final do período. Em relação às tecnologias de micro e minigeração distribuídas, o supracitado documento indica que a fotovoltaica apresenta maior potencial de penetração, com capacidade instalada estimada de cerca de 10 GW em 2029.

Nesse cenário, a instalação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água aparece como mais uma alternativa de aplicação, com potenciais ganhos de eficiência. Os recentes projetos-pilotos nacionais com uso de tecnologia solar fotovoltaica flutuante (FVF) associados a usinas hidrelétricas vêm ganhando visibilidade e seus resultados serão importantes para acurar os benefícios desta tecnologia, ainda pouco estudados.

Assim, a presente publicação visa trazer outras questões pertinentes à tecnologia de usinas fotovoltaicas flutuantes, apontando seus possíveis benefícios, limitações e desafios, além de abordar aspectos socioambientais e jurídicos.

2. DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

A principal diferença entre um sistema solar fotovoltaico convencional (em terra) e uma usina fotovoltaica flutuante (FVF) é a plataforma flutuante (estruturas de suporte para fixação dos módulos fotovoltaicos, cabos e em alguns casos também inversores), juntamente com ancoragem e ancoradouro.

Um sistema fotovoltaico convencional em solo é composto principalmente por módulos fotovoltaicos, inversores e estruturas de suporte dos módulos, que podem ser fixas ou com rastreamento de 1 ou 2 eixos.

Basicamente, uma usina fotovoltaica flutuante é constituída de (Figura 1):

- (i) Módulos fotovoltaicos: captam a irradiação solar e convertem em energia elétrica;
- (ii) Plataformas flutuantes: estrutura de suporte para instalação dos módulos fotovoltaicos, além de proporcionar estabilidade e flutuabilidade a estes, contendo passarela para manutenção, suporte para os cabos elétricos e inversores, em alguns casos;
- (iii) Ancoragem e amarração: para fixação da plataforma flutuante nas margens e/ou no fundo do corpo d'água, e que deve ser capaz de resistir aos esforços causados pela variação do nível d'água e pelo vento; e
- (iv) Cabos elétricos: podendo ser inclusive cabos subaquáticos.

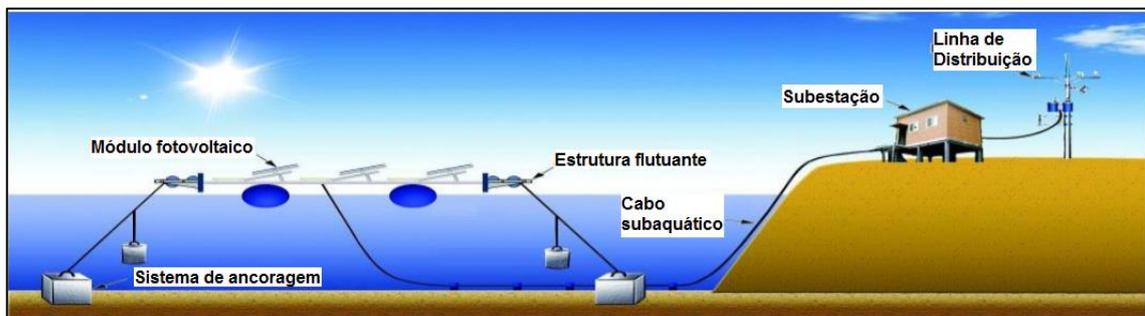


Figura 1 - Esquema geral solar fotovoltaico flutuante.

Fonte: Adaptado de Choi (2014)

Dentre as plataformas flutuantes em desenvolvimento pela indústria, é possível observar diferentes tipos:

- (i) Flutuadores para suporte e fixação direta dos módulos fotovoltaicos (Figura 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5).

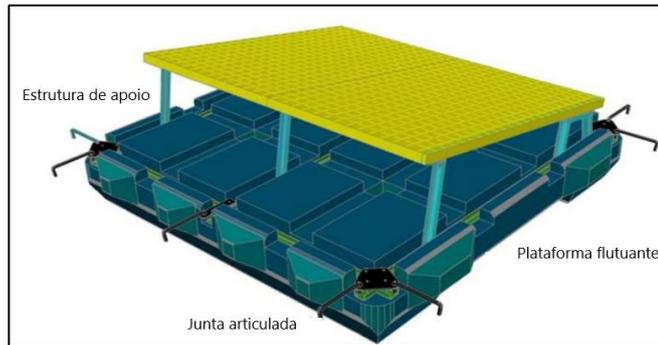


Figura 2 - Componentes básicos de uma estrutura flutuante.
 Fonte: Santafé *et al.* (2014)

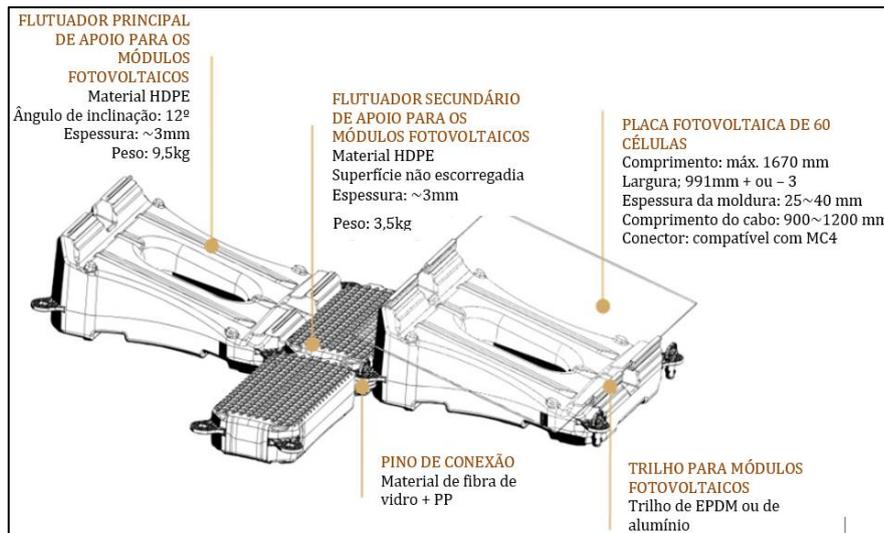


Figura 3 - Suporte para FVF da Hydrelío®.
 Fonte: Adaptado de Alternative Energy (2019)



Figura 4 - Suporte para FVF da Hydrelío - Fazenda Figueiredo das Lages, Cristalina - GO.
 Fonte: Sunlution (2019)



Figura 5 - Plataforma fotovoltaica flutuante da Isifloating.
 Fonte: Isisgenere (2019)

(ii) Flutuadores + Estruturas metálicas (para apoiar os módulos fotovoltaicos) - são mais simples que o anterior, sendo similares aos sistemas em terra, como mostrado na Figura 6;



Figura 6 - Plataforma de estrutura de metal com flutuadores e módulos fotovoltaicos.
Fonte: Scotra (2019)

(iii) Membranas e tapetes - projetadas para suportar o estresse mecânico e a exposição ao sol, cobrem a superfície da água e criam uma base para instalação dos módulos (Figura 7).



Figura 7 – Plataforma FVF - Membrana.
Fonte: Ocean Sun (2019)

(iv) Estrutura tubular - módulos com suportes fixos, para maximizar a cobertura da área disponível, ou com rastreamento, para otimizar a geração de energia (Figura 8).

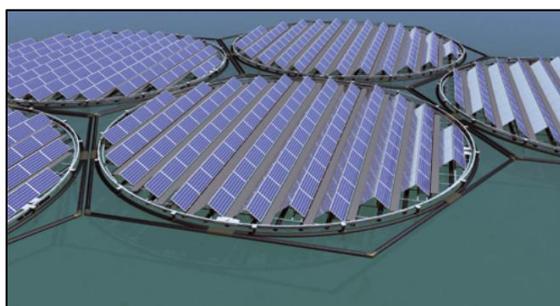


Figura 8 - Estrutura modular de uma FVF.
Fonte: Koine Multimedia (2019)

O sistema de ancoragem e amarração é uma parte crítica de uma FVF. Existem três formas de ancoragem: banco de ancoragem ou ancoragem em bloco, ancoragem inferior ou de fundo, e pilar ou estaca (Figura 9).

Para definir o sistema de ancoragem do projeto é necessário obter dados do local como topografia, batimetria, composição do solo, variação do nível d'água, velocidade e direção do vento e características de operação do reservatório (velocidade, amplitude e frequência

de deplecionamento, por exemplo). A ancoragem dos blocos é mais adequada a lagoas pequenas e com pouca profundidade, porém, a maioria das instalações flutuantes é ancorada no fundo. Independentemente do método, esta precisa ser projetada de forma a garantir estabilidade e flutuabilidade das instalações pelo tempo em que deverá operar (cerca de 25 anos ou mais). Destaca-se que o dimensionamento do sistema de ancoragem pode ser mais complexo em reservatórios com variações significativas do nível d'água.

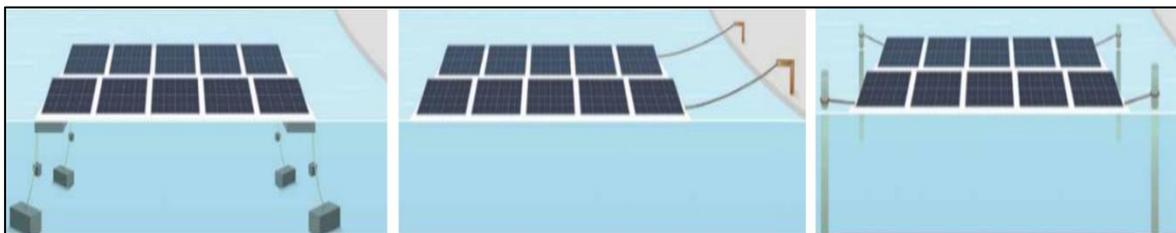


Figura 9 - Esquemático dos tipos de ancoragem: (a) ancoragem inferior ou de fundo; (b) banco de ancoragem ou ancoragem em bloco; (c) pilar ou estaca.

Fonte: World Bank Group; SERIS; ESMAP (2019)

Do mesmo modo que no sistema fotovoltaico convencional, é possível utilizar rastreador de 1 eixo (vertical) também no caso de fotovoltaico flutuante, vide Figura 10 e Figura 11. O mecanismo de rastreamento de uma FVF pode ser através de uma grande plataforma flutuante que pode girar em torno de um eixo vertical, de propulsores que quando acionados fazem a plataforma girar, ou ainda por meio de um sistema rolante que faz girar a plataforma flutuante (Figura 10). Há também inovação nesta área de FVF com estrutura da plataforma flutuante com rastreamento em 2 eixos, e uso de módulos fotovoltaicos bifaciais para melhor aproveitamento da irradiação solar e consequente aumento da produção de energia (Figura 11). Contudo, no caso de módulos bifaciais, ao contrário do que se poderia inferir, o albedo na água é bastante reduzido, já que a luz é refletida nesta de maneira especular e não difusa. Assim, o ganho com geração de energia adicional proporcionado por estes módulos é menos relevante, devendo-se em parte à reflexão nos demais módulos e nos próprios flutuadores.

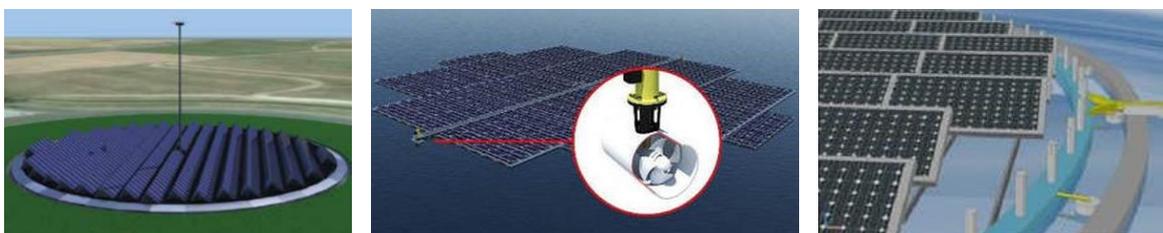


Figura 10 - Tipos de rastreamento de 1 eixo de FVF: (a) eixo vertical; (b) com propulsores; (c) com roda rolante para girar a plataforma principal.

Fonte: Koine Multimedia (2019)

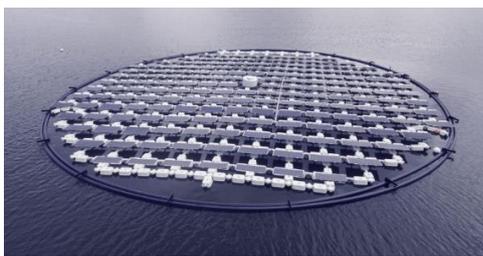


Figura 11 - Estrutura flutuante com rastreamento em 2 eixos.
Fonte: SolarisFloat (2019)

3. POTENCIAIS BENEFÍCIOS E DESAFIOS

Diversos estudos sobre usinas fotovoltaicas flutuantes indicam possíveis vantagens com a implantação de FVF, tais como ganhos de eficiência; redução de perda por sombreamento e sujeira; e redução da evaporação dos reservatórios. Por outro lado, algumas desvantagens também são observadas, como o acúmulo de dejetos de pássaros e impacto na vida aquática local. Esses e outros itens são ilustrados na Figura 12 e serão discutidos em detalhes a seguir.

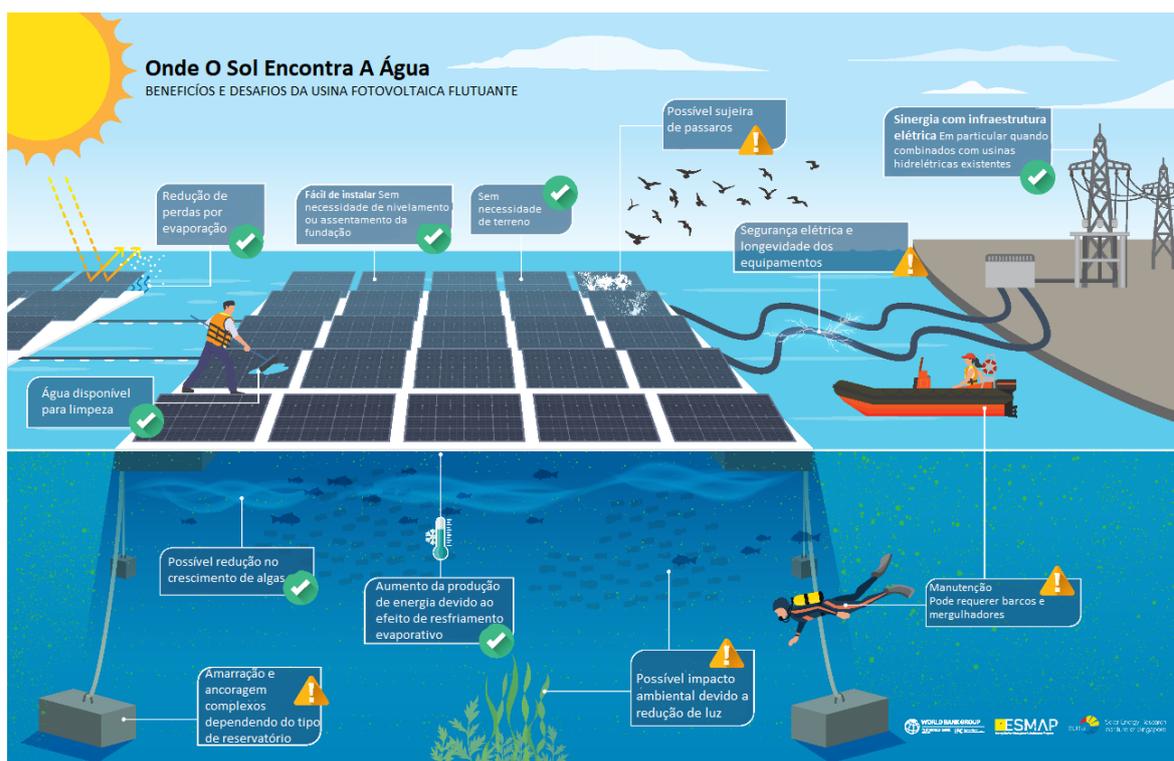


Figura 12 - Benefícios e desafios da solar flutuante.
Fonte: World Bank Group; SERIS; ESMAP (2019)

a) Ganhos de eficiência

A perda de eficiência nos módulos fotovoltaicos está diretamente relacionada ao aumento da temperatura, que, para as tecnologias de silício, atualmente predominantes, é da ordem de 0,4 a 0,5 %/°C. Assim, um possível aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos de uma FVF é uma das vantagens mais citadas em diversos estudos, dado que a temperatura de operação dos módulos instalados sobre a água tende a ser mais baixa do que a de um sistema fotovoltaico em solo. Registram-se temperaturas entre 5 e 20% inferiores nestas instalações, o que depende muito da localização, do clima da região e da estrutura de flutuação utilizada (REC, 2018).

Esse benefício, porém, ainda não está claro. Enquanto os fornecedores de estruturas flutuantes indicam ganhos de até 25% na produção de energia, estudos experimentais apontam resultados distintos. Um estudo na Coreia do Sul (CHOI, 2014) encontrou ganhos de 11% da produção FVF em relação a uma usina convencional com estruturas fixas.

Sacramento, et al. (2015) encontraram ganhos de eficiência entre 9,5% e 14,5%. Alencar Filho et al. (2018) não identificaram redução significativa de temperatura do módulo flutuante, comparado com um módulo equivalente instalado sobre o solo, conseqüentemente, tampouco se observou aumento expressivo da eficiência da conversão energética. Por sua vez, um estudo experimental com usinas flutuantes na Itália (CAZZANIGA, CICU, *et al.*, 2018) aponta que a produção com FVF é 4% maior do que em solo com estruturas fixas, porém, quando comparada com FV com rastreamento, a produção da FVF é bastante inferior.

Tendo em vista que o resfriamento evaporativo depende da temperatura de bulbo úmido local, que por sua vez depende da temperatura ambiente e da temperatura de bulbo seco, além da velocidade do vento, tais ganhos dependem do local considerado. Regiões do semiárido com alta velocidade de vento tendem a ter um ganho superior a localidades com alta umidade e menor incidência de ventos (GALDINO e OLIVIERI, 2016).

Importante destacar que os ganhos estimados na maioria dos estudos consideram instalações fixas, enquanto mais de 95% dos atuais projetos fotovoltaicos no Brasil consideram estruturas de rastreamento em um eixo (EPE, 2020), que proporcionam ganhos da ordem de 13% a 22%, com vantagens maiores em menores latitudes (GUARNIERI, 2017). Embora também seja possível o rastreamento em estruturas flutuantes, essa não é tendência observada nas recentes instalações. Assim, é importante atentar sempre para a base de comparação, a fim de certificar-se que esta considera as práticas de dimensionamento correntes para o local de estudo.

Ainda, o crescimento na utilização de módulos bifaciais pode representar uma vantagem para a utilização de módulos em solo, mas talvez não para os sistemas flutuantes, uma vez que a maior parte da reflexão da água ocorre de maneira especular, e não pode ser aproveitada pela face posterior dos módulos (a menos de momentos no qual a reflexão ocorra exatamente nesse ponto). Adicionalmente, em alguns tipos de flutuadores, como os da Figura 4 e da Figura 5, as costas dos módulos ficam bloqueadas (assim como em um telhado), praticamente anulando o aproveitamento do albedo. Para os módulos instalados no solo, embora os ganhos com essa tecnologia ainda sejam incertos, estima-se que sejam da ordem de 4 a 15% a depender do local, tipo de módulo, e albedo, em adição aos ganhos com rastreamento (AYALA PELAEZ, DELINE, *et al.*, 2019).

b) Sujeira

As usinas flutuantes possuem a tendência de acumular menor quantidade da poeira transportada pelo vento em seus painéis, pois são instaladas longe do solo e sobre o espelho d'água (DA SILVA, 2019). Dessa forma, requerem menores quantidades de água

para limpeza do que usinas fotovoltaicas localizadas em terra (CAZZANIGA, ROSA-CLOT, *et al.*, 2019).

O uso de água pode ser um fator de complexidade socioambiental para UFVs em terra, uma vez que, no Brasil, as áreas de maior potencial de geração situam-se em regiões de pouca disponibilidade hídrica. Nas usinas flutuantes, a água está disponível *in loco*, podendo ser utilizada para a limpeza dos painéis, a depender de suas características (SAHU, YADAV e SUDHAKAR, 2016).

Por outro lado, as usinas flutuantes podem se transformar em áreas de pouso para a avifauna (COSTA, 2017) e de acúmulo de dejetos de pássaros nos módulos flutuantes com maior frequência do que nos módulos em terra, podendo causar um incremento nos custos de limpeza ou nas perdas por sujeira. A Figura 13 ilustra esse problema em um sistema de testes de Cingapura.



Figura 13 – Dejetos de pássaros em módulos flutuantes.
Fonte: (REINDL, 2018)

Os dejetos da avifauna nos painéis, em última instância, contribuem para o aumento da disponibilidade de nutrientes na água, principalmente nitrogênio e fósforo (DESSBORN, HESSEL e ELMBERG, 2016). Em função da quantidade de módulos a serem instalados e também das condições locais, como a densidade de aves no local, a concentração de nutrientes naturais e o tempo de residência da água, estes efeitos podem ser significativos e acarretar alterações na qualidade ambiental. Eventuais aplicações de produtos químicos para limpeza, ou mesmo para minimizar o acúmulo de sujeira, poderá trazer ainda mais efeitos negativos para a qualidade da água (COSTA, 2017).

c) Sombreamento

Além do possível menor acúmulo de poeira, outro benefício esperado é a redução do sombreamento nos módulos fotovoltaicos, que associada à redução da temperatura de

operação tendem a aumentar a geração de energia em comparação com uma instalação FV em terra com inclinação similar.

Contudo, destaca-se que tal redução é devido à inclinação utilizada nas usinas flutuantes, que tende a ser inferior à ótima, especialmente em latitudes mais altas, para redução dos esforços de ventos. Sistemas com rastreamento de um eixo também costumam apresentar perdas por sombreamento mais elevadas, dada a necessidade de maior espaçamento entre fileiras para evitá-lo. Assim, novamente deve-se atentar se a comparação entre a usina flutuante e a em terra está considerando um projeto típico para a localidade em questão.

Outro ponto relevante diz respeito à variação do nível d'água do reservatório, que pode afetar a inclinação dos módulos caso os flutuadores sejam instalados próximo à margem, podendo causar maior sombreamento ou à operação em ângulo desfavorável. Em reservatórios que sofram deplecionamento durante a operação, como em hidrelétricas reversíveis e usinas de regularização, esse efeito pode ser ainda mais acentuado.

d) Evaporação dos Reservatórios

Segundo Farfan e Breyer (2018) , a cobertura de 25% da superfície de reservatórios de hidrelétricas com FVF poderia aumentar em 6,3% a disponibilidade de água, por redução da evaporação. Rosa-Clot, Tina E Nizetic (2017) estimaram por meio de modelos matemáticos o efeito da cobertura FVF em reservatórios na Austrália, concluindo pela redução da taxa de evaporação em mais de 90%. Resultado equivalente foi estimado por Taboada, *et al.* (2017) ao avaliar o efeito da cobertura FVF em lagoas no Chile. Destaca-se que as regiões estudadas apresentam naturalmente elevadas taxas de evaporação, em função do clima seco. Logo, a cobertura desses corpos d'água tem efeito significativo.

Assim, os impactos na redução de evaporação podem ser interessantes em locais com baixa disponibilidade hídrica. Ressalta-se, contudo, que há outras soluções para redução de evaporação em reservatórios que podem ser mais interessantes em termos de viabilidade econômica. Gugliotti (2015), descreve alternativas para redução de evaporação utilizando filmes superficiais, que permitiria inclusive outros usos da água (embora com perda de eficiência do filme) de maneira concomitante à aplicação. Malandrino, *et al.* (2015) discutem o uso de bolas de sombra para redução de evaporação, com estudo de dois casos, em Israel e em Los Angeles (EUA).

De toda forma, cabe lembrar que, em grandes corpos de água, não é esperado que a cobertura de módulos seja relevante em termos de fração da área total. Assim, a redução da evaporação, embora seja um ganho acessório das usinas flutuantes, não é a solução para esta questão.

No entanto, para os casos nos quais sejam adotadas soluções que recubram grande parte do reservatório, acarretando significativa redução da evaporação, deverão ser estudadas também as alterações no microclima local (GALDINO E OLIVIERI, 2016; FERRER-GISBERT, *et al.*, 2013; SANTAFÉ *et al.*, 2014; GAIKWAD E DESHPANDE, 2017; WÄSTHAGE, 2017; DINESH E PEARCE, 2016; CAZZANIGA, 2019).

e) Impacto na Vida Aquática

Diversos aspectos devem ser considerados para avaliação das alterações na biota aquática oriundas da implantação das FVFs, sendo o mais relevante o porte do empreendimento. A implantação em pequena escala das FVFs tende a apresentar impactos na vida aquática irrelevantes, podendo, em alguns casos, resultar em alterações positivas para os organismos aquáticos (COSTA, 2017). Estas alterações positivas no ambiente são ocasionadas em função da ocorrência de níveis intermediários de distúrbios, que tendem a aumentar a biodiversidade local (VERA Y CONDE e ROCHA, 2006), possivelmente associados à criação de nichos ecológicos específicos.

O sombreamento de áreas do reservatório é um bom exemplo de efeito que possui uma certa dubiedade em relação às interferências na vida aquática. Em pequena escala, o sombreamento pode apresentar aspectos positivos relacionados à criação de áreas de abrigo e forrageamento da ictiofauna. Ao passo que, caso sejam implantadas em um grande percentual da superfície do reservatório, o sombreamento pode causar a redução da atividade fotossintética local, acarretando desequilíbrios na cadeia trófica com eventuais favorecimentos de espécies e/ou redução de determinadas populações (COSTA, 2017; DEMPSTER E TAQUET, 2004; SAHU *et al.*, 2016; GALDINO E OLIVIERI, 2016).

Outro efeito importante é o aumento de incrustação nas instalações associadas às usinas FVFs, tais como sistemas de ancoragem e flutuadores. A depender do local da instalação, poderá haver interferências sobre a fauna bentônica, devido às instalações dos sistemas de ancoragem, podendo interferir também sobre a dinâmica de movimentação de sedimentos (COSTA, 2017). Este aumento da fauna bentônica associado à incrustação nas estruturas pode acarretar em um aumento dos fluxos de matéria orgânica da coluna d'água para o sedimento, podendo ocasionar a diminuição dos níveis de oxigênio nas camadas de fundo.

Neste sentido, a escolha do local de instalação das usinas possui especial relevância em relação às alterações no meio ambiente, sendo interessante privilegiar as regiões com maior fluxo de água e conseqüentemente menor tempo de residência, obviamente sem que haja comprometimento às estruturas.

f) Geração Híbrida com Hidrelétricas

A instalação fotovoltaica flutuante no reservatório de uma hidrelétrica pode resultar na otimização do uso da rede de transmissão/distribuição. Outra vantagem seria a possibilidade de armazenar mais água caso a geração fotovoltaica desloque a hidrelétrica, atuando como uma “bateria virtual”. Porém, tal esquema de operação só seria possível em usinas com reservatório. Em usinas a fio d’água, com a capacidade de regularização mais limitada, não haveria essa versatilidade na operação, comportando-se ambas de maneira mais próxima a um conjunto não despachável. No caso de usinas hidrelétricas reversíveis, a FVF poderia ainda contribuir com a energia necessária para o bombeamento de água ou para aumentar a energia injetada na rede.

De fato, os estudos sobre usinas híbridas (EPE, 2018) tratam dos benefícios de usinas associadas, especialmente se fosse possível a contratação de um MUST/MUSD inferior à soma das potências das duas fontes, o que depende de mudanças regulatórias. O estudo destaca ainda que, no caso de associação de usinas solares com hidrelétricas, é necessária a discussão sobre questões operativas, já que a fonte hídrica pode ser despachada centralizadamente, ao contrário da fotovoltaica.

Na questão do hibridismo, a princípio é indiferente a fotovoltaica ser flutuante ou instalada em terra, ao lado do reservatório. Inclusive, a maior planta híbrida solar-hidrelétrica em operação, em Qinghai, China, não utiliza FVF, e sim um sistema montado em terra, a 30 km do reservatório (CAZZANIGA, ROSA-CLOT, *et al.*, 2019).

Discussões mais detalhadas a respeito de usinas híbridas não serão escopo deste estudo, pois estas já foram realizadas no estudo já citado da EPE, bem como em Nota Técnica mais recente (EPE, 2019), que apresentou experiências internacionais e aspectos relevantes ao planejamento com hibridismo. Adicionalmente, há a Consulta Pública n. 014/2019 da ANEEL sobre o tema “Usinas híbridas”, onde são tratadas questões regulatórias.

g) Uso da terra

Uma das vantagens da usina solar flutuante está no fato de, ao contrário das usinas fotovoltaicas convencionais, esta praticamente não ocupar espaço em terra, apenas a área necessária para o eletrocentro e a conexão. Essa característica pode ser útil principalmente em países com alta densidade populacional e/ou com restrição de terra firme, como ocorre por exemplo na Ásia, conforme exemplos que serão citados no capítulo 4, uma região de alta densidade populacional e topografia complexa, dificultando o aproveitamento fotovoltaico em terra.

No Brasil, a escassez de áreas para a implantação desses projetos não é considerada uma questão particularmente relevante. Em estudo, excluindo-se unidades de conservação,

terras indígenas, comunidades quilombolas, áreas de Mata Atlântica com vegetação nativa, áreas urbanas, reserva legal e área de preservação permanente, estimou-se potencial técnico para instalação de usinas fotovoltaicas superior a 28.500 GW. Foram consideradas apenas áreas com declividade inferior a 3%, e área superior a 0,5 km² (EPE, 2016).

Ainda que não haja escassez de áreas, a economia com a não necessidade de compra ou arrendamento de terra, e com a preparação do solo pode ser citada como uma vantagem, evitando-se ainda impactos socioambientais associados à alteração de uso do solo, movimentação de terra, eventual supressão vegetal, perturbação da fauna, dentre outros. Muito embora o gasto com terreno seja em geral baixo nos projetos no Brasil, em determinadas regiões tal vantagem pode ser considerada. De maneira semelhante, restrições de locais de implantação podem levar essa solução a ser interessante, como por exemplo o uso de açudes em propriedades rurais, mantendo a terra livre para a produção agropecuária e produzindo energia na modalidade micro/mini geração distribuída (*net metering*) ou autoprodução.

Em contrapartida, deve-se considerar que as instalações fotovoltaicas flutuantes de grande porte poderão implicar em restrições à navegação, eventualmente causando interferências em atividades recreativas, de pesca e de turismo. A alteração na paisagem também poderá impactar as atividades de lazer e turismo (COSTA, 2017; DA SILVA, 2019).

h) Custos de investimento

As possíveis desvantagens da solar fotovoltaica flutuante estão principalmente relacionadas à viabilidade econômica, sobretudo em função dos custos adicionais com instalação de plataformas flutuantes, o que será retomado adiante no capítulo 5. Por se tratar de uma nova tecnologia, requer equipamentos e conhecimentos especializados, alguns dos quais ainda estão sendo desenvolvidos ou aprimorados.

i) Instalação e Manutenção

Nas referências consultadas depreendem-se algumas dificuldades para a instalação deste tipo de tecnologia, se comparada à fotovoltaica convencional em solo. Fatores como rajadas de vento e outras condições meteorológicas podem ser complicadores na montagem e na ancoragem dos módulos fotovoltaicos, e também na fase de operação da usina. A variação do nível d'água em reservatórios, se significativa, também pode ser um complicador. Por outro lado, em locais com ancoragem e fixação menos complexas, como em lagos artificiais ou açudes, a rapidez e facilidade de instalação são destacados como vantagens.

Os corpos d'água onde serão instaladas as FVF podem abrigar patrimônio arqueológico subaquático, de forma que deverão ser realizados estudos prévios para sua identificação e, se necessário, seu resgate ou a indicação de alteração locacional do projeto (COSTA, 2017).

Na questão da operação, pode haver dificuldades adicionais em relação aos projetos em terra. A manutenção da ancoragem ao longo da vida útil do projeto, por exemplo, pode requerer mão de obra especializada, com o uso de mergulhadores. A utilização de cabos subaquáticos também merece atenção especial, por questões relacionadas à segurança e à fauna aquática. Por outro lado, uma questão positiva a ser citada é a disponibilidade de água para limpeza dos módulos, desde que seja permitido seu uso direto, o que deve ser discutido com os órgãos ambientais.

j) Vida Útil dos Equipamentos

No longo prazo, o impacto da umidade nos módulos fotovoltaicos e a possibilidade de corrosão de fixadores são pontos que devem ser avaliados. Fato é que o problema de corrosão é limitado quando o FVF está instalado em corpos de água doce, enquanto que em água salgada devem ser adotadas soluções para amenizar tal condição (WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP, 2019). A vida útil dos flutuadores também pode ser um limitante, e essa questão, assim como eventuais necessidades de troca dos mesmos durante a operação devem ser avaliadas na fase de projeto.

A maior umidade a que os módulos são expostos quando próximos da água pode ainda acelerar sua degradação, sobretudo pelo efeito PID (*Potential Induced Degradation*) (BORBA e NOVAK, 2018), o que reforça a importância da escolha de equipamentos adequados à aplicação flutuante. Módulos com filme posterior de maior resistência à umidade ou de duplo vidro são considerados mais adequados para essas aplicações, podendo haver algum sobrecusto em relação aos módulos convencionais (BRIDGE TO INDIA, 2018).

Assim como nas usinas solares fotovoltaicas instaladas em terra, o descarte dos painéis e demais componentes das plantas representa um desafio para a gestão socioambiental. O Brasil, por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), instituiu a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, mas ainda não existe infraestrutura nacional de reciclagem especializada em painéis fotovoltaicos.

4. DADOS INTERNACIONAIS E PROJETOS NO BRASIL

O estudo do Grupo Banco Mundial (WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP, 2019) apresenta uma estimativa do potencial da capacidade instalada da FVF (em GWp) em reservatórios, e outra da geração de energia para cada continente (Tabela 1), considerando diferentes percentuais de cobertura, resultando em cerca de 4.000 GW e 5.200 TWh por ano ao se considerar 10% de utilização.

Tabela 1 – Capacidade máxima e potencial de geração de energia de FVF em reservatórios

| Continentes | Área de superfície total disponível (km ²) | Número de corpos d'água avaliados | Potencial FVF (GWp) | | | Possível geração anual de energia (GWh/ano) | | |
|----------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------|---|------------------|------------------|
| | | | Porcentagem de área superficial usada | | | Porcentagem de área superficial usada | | |
| | | | 1% | 5% | 10% | 1% | 5% | 10% |
| África | 101.130 | 724 | 101 | 506 | 1.1011 | 167.165 | 835.824 | 1.671.648 |
| Ásia e Oriente Médio | 115.621 | 2.041 | 116 | 578 | 1.156 | 128.691 | 643.456 | 1.286.911 |
| Europa | 20.424 | 1.082 | 20 | 102 | 204 | 19.574 | 97.868 | 195.736 |
| América do Norte | 126.017 | 2.248 | 126 | 630 | 1.260 | 140.815 | 704.076 | 1.408.153 |
| Austrália e Oceania | 4.991 | 254 | 5 | 25 | 50 | 6.713 | 33.565 | 67.131 |
| América do Sul | 36.271 | 299 | 36 | 181 | 363 | 58.151 | 290.753 | 581.507 |
| Total | 404.454 | 6.648 | 404 | 2.022 | 4.044 | 521.109 | 2.605.542 | 5.211.086 |

Fonte: Adaptado de World Bank Group; SERIS; ESMAP (2019)

Por sua vez, os estudos de Farfan & Breyer (2018) estimam um potencial mundial de até 5.700 GW e 8.000 TWh por ano com a cobertura de 25% dos reservatórios de água.

Para os Estados Unidos, o NREL também publicou um estudo detalhado com estimativa do potencial da tecnologia fotovoltaica flutuante em reservatórios artificiais do país. Um total de 24.419 reservatórios (representam 27% do número de lagos artificiais e 12% da área destes) foram considerados adequados para implantação de fotovoltaica flutuante. Destes, considerando que sistemas fotovoltaicos flutuantes cobririam 27% da área identificada como apropriada, o estudo indica como resultado uma geração estimada de 10% da produção elétrica atual do país (SPENCER, MACKNICK, *et al.*, 2019).

O instituto alemão Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems realizou um estudo analisando o potencial de sistemas flutuantes em lagos resultantes da mineração de carvão, estimando um potencial técnico de 56 GWp. Excluindo áreas utilizadas para recreação, turismo, e áreas de conservação, o potencial econômico resultante foi de 2,74 GWp (FRAUNHOFER ISE, 2020).

No estudo apresentado pelo Grupo Banco Mundial (WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP, 2019), verifica-se que a capacidade instalada de FVF no mundo saltou de 528 MWp em

2017 para 1.314 MWp em 2018 (Figura 14). Como projeção para os próximos anos, a GTM Research (2018) prevê incrementos da ordem de 1.500 MWp por ano até 2022, conforme Figura 15.

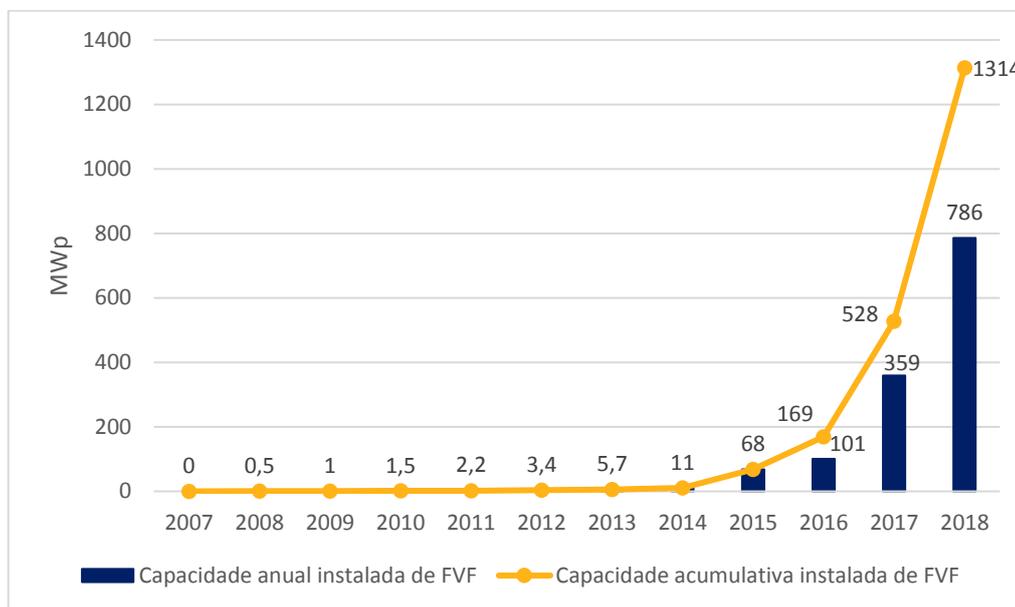


Figura 14 – Capacidade instalada FVF no mundo e instalações anuais
 Fonte: Adaptado de World Bank Group; SERIS; ESMAP (2019)

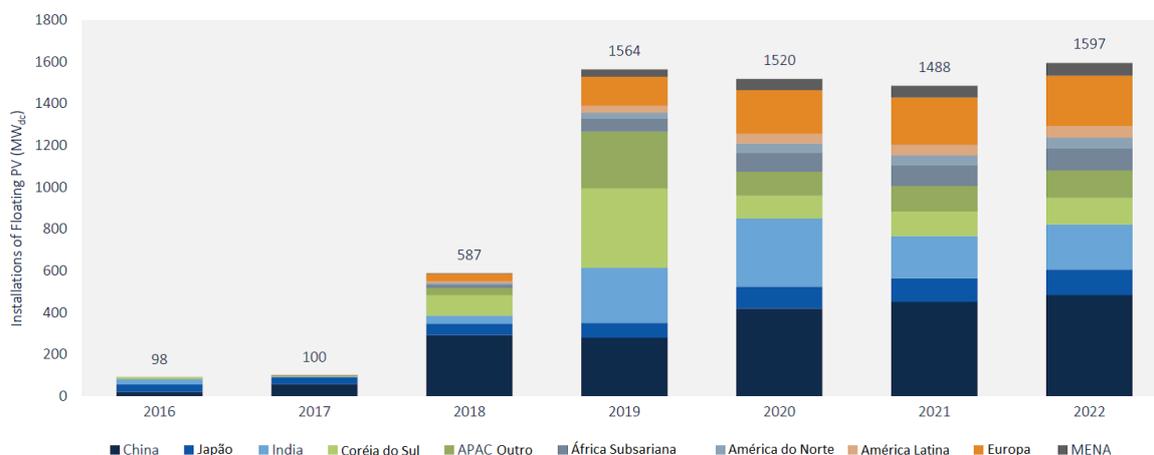


Figura 15 – Projeção de instalações FVF por país e região, 2016-2022.
 Fonte: Adaptado de Gtm Research (2018)

A maioria das grandes instalações recentes foi feita na China, especialmente em lagos de mineração. A Figura 16 apresenta uma dessas plantas flutuantes, instalada na província de Anhui, na China. A usina entrou em operação em março de 2019, tem cerca de 70 MWp, possuindo mais de 194.000 módulos fotovoltaicos e ocupando uma área de mais 60 hectares.



Figura 16 - Usina FV Anhui CECEP, na China
 Fonte: Ciel & Terre (2019)

Conforme visto, as estimativas são de crescimento acelerado nos próximos anos, ainda bastante influenciadas pela China e pela Coreia do Sul, mas com crescimento importante de outros mercados, com destaque para a Índia. O país tem metas agressivas de inserção de renováveis no setor elétrico, e, dada a restrição de áreas aptas com infraestrutura adequada de conexão, a Solar Energy Corporation of Índia (SECI), instituição governamental, indicou no final de 2017 intenção de construção de até 10 GW de FV nos três anos seguintes (SECI, 2017). Em outubro de 2018, reportava-se haver cerca de 1,5 GW em projeto, e menos de 3 MW instalados (BRIDGE TO INDIA, 2018).

Já o “International Technology Roadmap for Photovoltaics” de 2018 estima que, ao final da década de 2020, cerca de 10% das instalações fotovoltaicas serão desse tipo, conforme Figura 17.

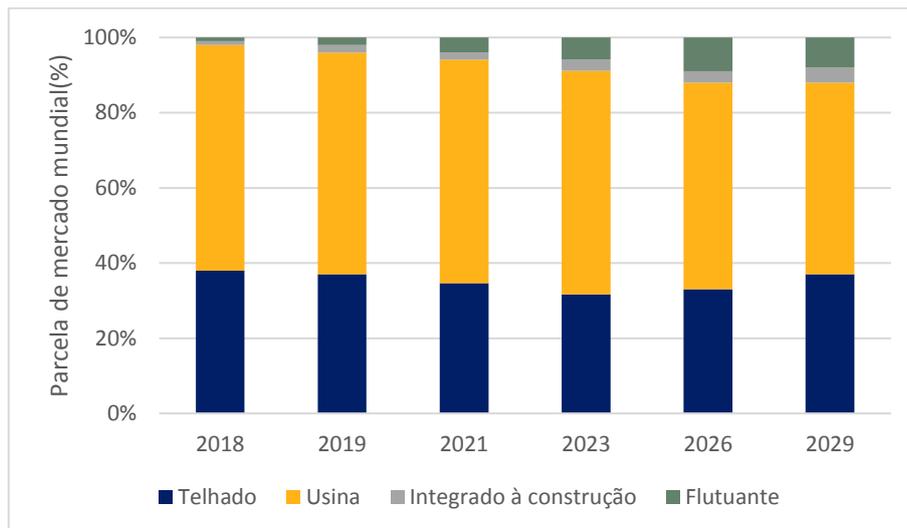


Figura 17 - Projeção de fração de tipo de sistemas fotovoltaicos.
 Fonte: Adaptado de ITRPV (2019)

4.1. Aproveitamento no Brasil

Com relação à possibilidade de maior inserção dessa tecnologia no Brasil, a princípio, não há impedimentos regulatórios, ao menos no que diz respeito ao setor elétrico. Entende-se como possível inclusive a participação nos leilões de energia do Ambiente de Contratação Regulada (ACR), ainda que nenhum projeto desse tipo tenha sido cadastrado na EPE até então. Há que se observar, porém, questões relativas ao licenciamento ambiental do empreendimento, bem como comprovação do direito de usar e dispor do local destinado ao projeto.

Referente ao potencial FVF no Brasil, Strangueto (2016) estimou uma capacidade de até 4.519 GWp, utilizando reservatórios de hidrelétricas, com uma geração de 4.443 TWh por ano. Adicionalmente, o PNE 2050 (EPE, 2018) apresenta uma subseção sobre o potencial da geração fotovoltaica centralizada offshore no Brasil. O documento traz um exercício de quantificação desse potencial com base em dados de irradiação e restrições ambientais, que resultou na indicação de enorme potencial de irradiação solar sobre o mar brasileiro, especialmente na costa do Nordeste. É destacado, contudo, que há limitação dos modelos de estimativa do potencial solar sobre o mar, dada a ausência de estações offshore para sua validação, e este resultado deve ser utilizado com cautela. Assim, este documento não irá tratar de sistemas flutuantes offshore por entender que ainda não existem informações suficientes para pautar a discussão, mas apenas alguns projetos pilotos pelo mundo para este tipo de aplicação.

No Brasil, a maior usina fotovoltaica flutuante em operação encontra-se no reservatório da UHE Sobradinho, na Bahia. A primeira etapa do projeto conta com 1 MWp, inaugurada em julho de 2019, e terá capacidade de 2,5 MWp até 2020. Em fase de projeto encontra-se a FVF que será instalada no reservatório da UHE Balbina, também com capacidade prevista de 2,5 MWp.



Figura 18 - Usina solar fotovoltaica flutuante no reservatório da UHE Sobradinho
Fonte: visita técnica EPE em outubro de 2019

Em Goiás, o primeiro projeto FVF conectado à rede foi instalado em uma propriedade rural, em 2017, com 1.150 módulos fotovoltaicos e uma potência de 304 kWp (SUNLUTION, 2019).

A FVF instalada no reservatório da UHE Porto Primavera¹, em Rosana – SP, tem potência instalada de 50 kW, além de 250 kW em terra (Figura 19). Outro projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) recente instalou 100 kW de FVF no reservatório da hidrelétrica do município de Aimorés (MG), o qual será conectado na modalidade minigeração distribuída (ALSOL, 2019). Em fase de desenvolvimento, um projeto da empresa Furnas Centrais Elétricas implantará uma FVF de 200 kWp no reservatório da hidrelétrica de Itumbiara, associado a tecnologias de armazenamento.



Figura 19 - Usina Fotovoltaica Flutuante no reservatório da UHE Porto Primavera.

Fontes: (CETESB, 2019) e (IDEARI, 2019)

Destaca-se que os resultados desses projetos em andamento serão importantes para a discussão dos benefícios e limitações tratados no capítulo 3.

¹ Chamada de Projeto de P&D Estratégico ANEEL n. 019/2015, o Projeto Termosolar Porto Primavera consiste na construção de uma usina piloto de até 0,5 MW de capacidade instalada, de fontes termosolar, fotovoltaica e eólica, os quais poderão operar em conjunto com a geração hidrelétrica. Fonte: http://site.cesp.com.br/site_ped/projetos_destaque.html

5. CUSTOS DE INVESTIMENTO E DE OPERAÇÃO

Além dos desafios de construção e operação, detalhados no Capítulo 3, fator bastante relevante para a implantação de fotovoltaicas flutuantes são seus custos mais elevados em relação às plantas em solo. A Tabela 2 compara os custos de investimentos de uma fotovoltaica convencional (em solo) e uma fotovoltaica flutuante. Depreende-se que uma FVF tem um custo maior devido à estrutura flutuante (incluindo também sistema de fixação e ancoragem) e ao sistema de monitoramento. O CAPEX de uma FVF chega a ser quase 18% maior.

Tabela 2 – Comparação dos custos de investimento – FV em solo x FVF

| Componente | FVF 50 MWp (\$/Wp) | FV em solo 50 MWp (\$/Wp) |
|--|-----------------------|------------------------------|
| Módulos | 0,25 | 0,25 |
| Inversores | 0,06 | 0,06 |
| Sistema de montagem* | 0,15 | 0,10 |
| Balanço do sistema** | 0,13 | 0,08 |
| Projeto, construção, teste e comissionamento | 0,14 | 0,13 |
| Total CAPEX | 0,73 | 0,62 |

*Para FVF, o sistema de montagem inclui a estrutura de flutuação, ancoragem e amarração.
**Inclui monitoramento de sistema.

Fonte: Adaptado de World Bank Group; Seris; Esmap (2019)

Segundo Sahu *et al.* (2016), os flutuadores representam até 25% do custo total do projeto, mas os autores afirmam que esse montante seria geralmente menor que os custos de aquisição e preparo de um terreno de área equivalente e próxima. Apontam também que os custos de manutenção são geralmente menores na FVF, dada a disponibilidade de água para limpeza. Ressalta-se, porém, que essa comparação reflete as condições do local estudado, Índia.

Ainda com relação ao mercado indiano, um estudo da consultoria Bridge to India (2018) indica que os custos de investimento para uma fotovoltaica flutuante são entre 20 e 25% superiores aos de uma usina em terra, principalmente devido ao maior custo dos flutuadores. É destacado que atualmente estes são importados, e sugerido que, se fabricados localmente, a desvantagem de custos poderia cair para cerca de 10-15%. A Figura 20 resume essa comparação, da qual depreende-se que a ordem de grandeza da economia com transmissão e uso da terra é significativamente inferior ao incremento do custo das estruturas.

A consultoria Wood Mackenzie indica que as estruturas podem representar, respectivamente, 34% e 37% dos custos totais de instalação FVF na China e na Índia (WOOD MACKENZIE, 2019). A instituição destaca ainda a falta de padronização nesse tipo de instalação, o que implica em grandes variações nos custos de instalação. Por exemplo, na Coreia do Sul, a diferença entre o caso de baixo CAPEX e o de alto CAPEX é de cerca de

100%. O estudo do Banco Mundial (WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP, 2019) aponta no mesmo sentido, indicando que os custos de usinas FVF em diversos países, decorrentes de instalações e leilões realizados entre 2014 e 2018, variaram entre 0,8 e 3,12 USD/Wp, sendo 1,2 USD/Wp o valor médio.

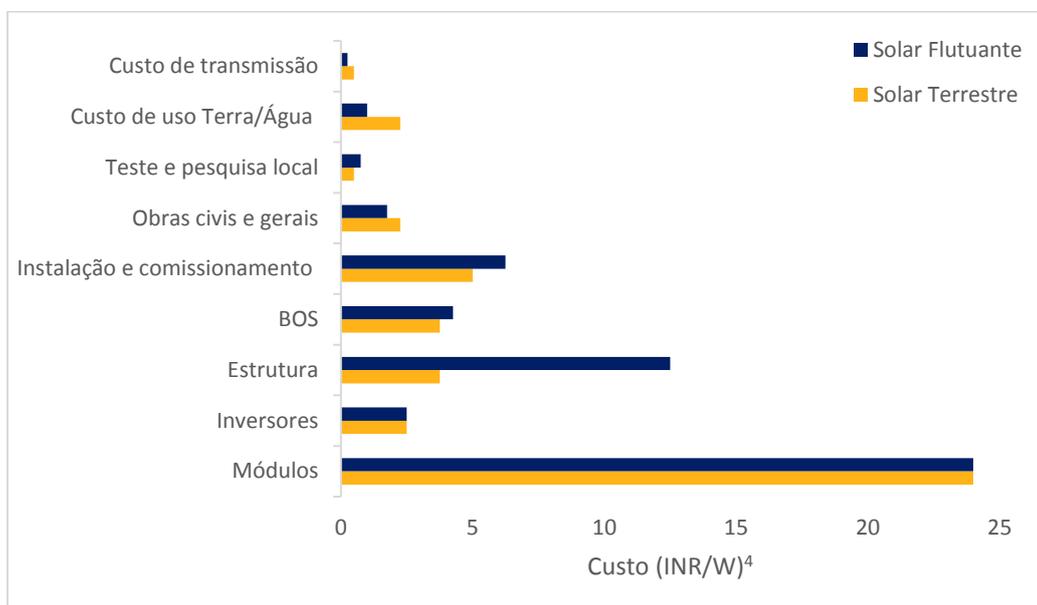


Figura 20 - Comparação de custos de investimento entre solar flutuante e em solo na Índia.
 Fonte: Adaptado de Bridge to India (2018)

Já com relação ao custo nivelado da energia, esse mesmo estudo compara os custos de duas instalações de 50 MW, em terra e flutuante, utilizando os mesmos custos para operação e manutenção, com um CAPEX 17% maior no segundo caso. O *Performance Ratio*, por outro lado, seria de 5% a 10% maior nas FVF. Conseqüentemente, o custo de geração FVF seria de 4% a 9% maior que o de instalações em solo, a depender do clima e do custo de capital. Contudo, cabe destacar que essa comparação é realizada considerando um sistema em solo de estrutura fixa, o que não corresponde a um sistema otimizado, considerando o recurso no Brasil, conforme discutido no Capítulo 2.

Outro ponto de discussão relevante quanto ao estudo citado é que, dadas as possíveis dificuldades adicionais de O&M, também apontadas no Capítulo 2, é possível que haja um incremento do custo de operação, diferentemente do que foi considerado no cálculo do custo nivelado de energia. Por ser uma tecnologia nova, ainda não há dados ou estudos suficientes que permitam avaliar se tal sobrecusto existe e qual sua magnitude.

Com relação aos custos dos componentes no mercado nacional, de acordo com os dados declarados pelos empreendedores à EPE para participação nos leilões de energia, a divisão de custos dos principais equipamentos para usinas fotovoltaicas em solo, considerando o leilão A-6/2019, foi aproximadamente: módulos (39%), inversores (9%), estruturas (15%) e outros equipamentos (6%) que inclui cabeamento, caixas de junção equipamentos de

² INR: Rúpias indianas

proteção e sistemas de supervisão, sendo os 31% restantes relacionados a conexão, obras civis e custos diversos (terreno, ações socioambientais, custos indiretos, logística, montagem, testes e seguro) (EPE, 2020).

Para as usinas fotovoltaicas em solo, os custos totais de investimento apresentaram queda nos últimos leilões, reduzindo as margens para acréscimos de custos nos projetos. Os custos de estruturas (incluindo rastreadores), por sua vez, têm mantido a mesma ordem de grandeza desde 2016, em termos absolutos. Contudo, dada a queda no custo total de investimento, as parcelas relativas a este componente têm crescido nos últimos leilões em termos relativos, tendo passado de 13% em 2016 para 15% do total do CAPEX em 2019, considerando a média dos projetos.

Assim, considerando que no caso de FVF, há um aumento de custo com o sistema flutuante (plataforma flutuante, ancoragem e cabos), sendo este superior ao da estrutura e suporte terrestre padrão, esses projetos tenderiam a ser menos competitivos, considerando-se que a estrutura em terra já representa uma parcela de custo relevante do projeto.

Destaca-se ainda que no Brasil, as regiões de melhor irradiação muitas vezes são pouco desenvolvidas, levando a baixos custos de aquisição de terrenos, sendo essa vantagem das usinas flutuantes pouco relevante.

6. LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Além das discussões apresentadas ao longo do texto, que agregaram informações socioambientais às questões tecnológicas e de regulação, com o objetivo de criar uma visão integrada, aqui abordam-se aspectos relacionados ao licenciamento ambiental.

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes surgiram dentro de um novo conceito de energia solar, para reduzir a demanda por terra e minimizar os impactos ambientais negativos associados com o desmatamento causados pelas instalações fotovoltaicas convencionais de geração centralizada (DA SILVA, 2019; CHOI, 2014). Ainda assim, essas instalações possuem potencial de interferir sobre outros aspectos relacionados ao meio ambiente e à sociedade. Dessa forma, torna-se necessário que o processo de licenciamento ambiental promova a identificação e o controle dessas interferências.

A localização e o porte do empreendimento deverão compor a definição do tipo e a esfera do licenciamento. Além disso, os usos existentes e previstos no corpo hídrico, a complexidade do ecossistema aquático e outros aspectos socioambientais orientarão o órgão licenciador sobre a necessidade de estudos e seus diferentes graus de complexidade, a emissão de autorizações específicas, bem como sobre o eventual envolvimento de órgãos anuentes.

No âmbito federal, destacam-se algumas Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) que comumente se aplicam ao licenciamento dos empreendimentos de geração de energia elétrica, tais como as Resoluções Conama n. 1/86 (que dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental) e n. 237/97 (que regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente e define licenciamento ambiental, licença ambiental, estudos ambientais e impacto ambiental regional), com destaque para a Resolução Conama n. 279/2001 que, ao estabelecer procedimentos para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, provavelmente, é a que mais se aproxima das características dos sistemas fotovoltaicos flutuantes. Podendo essa última ser combinada com a Resolução Conama n. 302/2002 que dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno.

7. ASPECTOS JURÍDICOS E DIREITO DE USO DO LOCAL

Neste momento, cumpre identificar quais desafios e oportunidades se apresentam, do ponto de vista jurídico, à instalação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água de reservatórios artificiais, principalmente em relação ao acesso do empreendedor aos locais onde tais sistemas serão implantados.

Para que sejam apresentadas considerações sobre a possibilidade de imediata implantação de usinas fotovoltaicas flutuantes, é necessário analisar o arcabouço legal hoje existente e as especificidades de tais empreendimentos, indicando inicialmente os normativos vigentes sobre a geração de energia elétrica no país.

Como estabelecido pela Constituição Federal (art. 21, inciso XII, letra "b"), a exploração dos serviços e instalações de energia elétrica no Brasil compete à União, que pode fazê-la diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão.

Ainda em conformidade com a matriz constitucional, cabe à lei promulgada em âmbito federal a regulamentação da exploração dos serviços e instalações de energia elétrica, incluindo aqueles oriundos da fonte solar fotovoltaica.

Regulando a matéria, no plano infraconstitucional, temos a Lei n. 10.848/2004, que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica; o Decreto n. 5.163/2004, que regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Ainda, conforme disposto no art. 4º *caput* da Lei n. 9.074/1995, as autorizações de exploração de serviços e instalações de energia elétrica poderão ser contratadas, prorrogadas e outorgadas observando as regras trazidas por aquele diploma legal, bem como aquelas dispostas pela Lei n. 8.987/1995.

Avaliando o teor das disposições legais acima referidas, incluindo conceitos e determinações, entende-se que esses podem ser aplicados imediata e diretamente às usinas fotovoltaicas flutuantes, uma vez que não diferem essencialmente de outras fontes de geração de energia.

Seguindo a análise, no que diz respeito à atividade de geração, os empreendimentos interessados em participar dos Leilões de Energia devem apresentar, independentemente da fonte, um rol de documentos previamente estabelecidos³, a fim de comprovar a sua viabilidade do ponto de vista técnico, ambiental e jurídico.

³ Conforme disposto nas *Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica* expedidas pela EPE, disponíveis em <http://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes/instrucoes-para-cadastramento> (consulta realizada em 13/11/2019).

Em relação especificamente à viabilidade jurídica do empreendimento, deve ser comprovada a garantia do direito de uso do imóvel onde ele será implantado; garantia, essa, que deve abranger todo o prazo de suprimento de energia previsto na norma aplicável ao respectivo leilão.

Como regra, a fim de demonstrar que possui direito de usar ou dispor do imóvel onde será instalado o empreendimento de geração de energia, para usinas em solo, o empreendedor deve reunir certidões de inteiro teor, expedidas pelo Registro Geral de Imóveis – RGI⁴, referentes a todas as matrículas que serão utilizadas pelo empreendimento e, caso o projeto envolva imóvel(is) de propriedade de terceiros, instrumento contratual celebrado entre o proprietário do(s) referido(s) imóvel(is) e o empreendedor⁵, assegurando a este o direito de usar ou dispor do(s) terreno(s) durante todo o prazo de suprimento de energia previsto na norma aplicável ao respectivo leilão.

De maneira análoga, no caso da instalação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água, entende-se que deverão ser apresentadas as licenças, outorgas e outros documentos necessários que comprovem o direito de uso do local destinado à implantação do empreendimento, de forma a assegurar o cumprimento de uma das obrigações do empreendedor que pretende fornecer, de forma firme, energia para o Sistema Elétrico.

Nessa linha, cumpre indagar se a apresentação dos documentos acima referidos é suficiente para comprovar o direito de usar ou dispor do local onde será implantada a usina fotovoltaica flutuante ou se, dadas as suas peculiaridades, alguma comprovação adicional ou diversa se faria necessária.

A resposta para este questionamento deverá considerar, por exemplo, elementos como o uso conferido ao reservatório onde será instalado o empreendimento (isto é, se ele é ou não efetivamente utilizado para a geração de energia hidrelétrica); a reunião, ou não, na mesma pessoa, das figuras do empreendedor hidrelétrico e do empreendedor da geração fotovoltaica pretendida; e a natureza pública ou privada do local onde será instalado todo o sistema fotovoltaico.

Em relação ao uso conferido ao reservatório, a implantação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água de reservatórios artificiais formados pela instalação de empreendimentos

⁴ As referidas certidões devem ser emitidas em data que não exceda a 30 (trinta) dias da data de cadastramento do empreendimento na EPE e deverão conter averbação do georreferenciamento, executado de acordo com Norma Técnica específica para tal finalidade e abrangendo toda a área a que se referir a matrícula.

⁵ O referido instrumento contratual deverá ser averbado na certidão de inteiro teor dos imóveis aos quais ele se refere. No caso de recusa, devidamente comprovada, da averbação do instrumento contratual por parte do cartório do RGI, fundamentada na suposta ausência de previsão legal (Lei n. 6.015/1973) para realização destes atos para a modalidade de contrato utilizada pelo empreendedor, deve ser comprovado o registro do instrumento contratual junto ao Cartório de Títulos e Documentos.

de geração hidrelétrica pode demandar a apresentação de documentação adicional àquela exigida para os empreendimentos fotovoltaicos instalados em terra.

Nessa esteira, tendo em vista as possíveis interferências que o empreendimento pode exercer no funcionamento do reservatório da hidrelétrica, a exigência de comprovação de anuência do empreendedor, assim como do poder concedente, em relação à implantação do parque fotovoltaico no reservatório, pode ser vista como uma medida que confere maior segurança jurídica ao processo.

Na hipótese de o empreendedor do sistema fotovoltaico ser também o responsável pela operação do empreendimento hidrelétrico no reservatório a ser compartilhado, o caminho a percorrer será mais curto, na medida em que pode ser entendida como suficiente a emissão de autorização do poder concedente para a instalação da usina fotovoltaica flutuante.

Em ambos os casos, todavia, forçoso enfrentar a questão da não coincidência do prazo de autorização para exploração do empreendimento hidrelétrico com o prazo de suprimento de energia que deverá ser atendido pelo empreendimento fotovoltaico. Esta questão assume especial relevância nas hipóteses em que o contrato de suprimento de energia do empreendimento fotovoltaico flutuante se encerrar após o término do prazo de autorização para exploração do empreendimento hidrelétrico. Caberá, assim, à regulação equacionar esse ponto, de modo a preservar a legítima expectativa dos agentes regulados e o atendimento do interesse público, neste caso expressado pelo alcance dos critérios de segurança do suprimento.

De igual forma, é preciso endereçar a questão da natureza jurídica dos imóveis necessários para instalação de todo parque gerador. No caso de a implantação envolver bens particulares, as diretrizes já traçadas nas Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica, com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica, expedidas pela EPE poderão ser utilizadas sem maiores problemas. Entretanto, na hipótese de utilização de bens públicos, será necessário adaptar a documentação exigida do empreendedor a esta peculiaridade.

Ainda para o caso de uma usina flutuante, a comprovação referente à existência de direito de usar ou dispor do local de instalação do empreendimento pode envolver questões ligadas à navegação e aos usos múltiplos do reservatório.

Sobre o tema, registre-se que a referida instalação, em tese, é compatível com o uso múltiplo das águas, que se apresenta como um dos fundamentos da Política Nacional de

Recursos Hídricos⁶. Importante ressaltar que o abastecimento humano e a dessedentação animal se apresentam como usos prioritários (art. 1º, inciso III, da Lei nº 9.433/97), a geração de energia hidrelétrica como uso primário do reservatório, enquanto a instalação dos sistemas fotovoltaicos, ainda que envolva a geração de energia elétrica, pode ser classificada como uso alternativo do reservatório.

Neste contexto, a depender do tipo de reservatório, podem ser necessárias autorizações da Agência Nacional de Águas (ANA), Marinha do Brasil, Capitania dos Portos, dentre outros órgãos. As legislações de base que disciplinam o gerenciamento de recursos hídricos, no âmbito federal, são a Lei n. 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e a Lei n. 9.984/2000, que dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas (ANA). Adicionalmente, existem normativas específicas publicadas tanto pela ANA quanto pelos Estados da Federação e Distrito Federal, bem como deliberações do Conselho Nacional de Recursos Hídricos e Normas da Autoridade Marítima - NORMAM expedidas pela Marinha. Dado o ineditismo da tecnologia, ainda não há clareza quanto a necessidade de autorizações em cada caso.

⁶ Nessa linha, o inciso IV do art. 1º da Lei n. 9.433/1997 dispõe que: "Art. 1º A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos: (...) IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;"

8. CONCLUSÕES

O mercado de energia solar fotovoltaica flutuante tende a crescer com o amadurecimento das tecnologias, abrindo uma nova frente para a expansão global de energia renovável e trazendo oportunidades de crescimento para vários países e mercados, especialmente em locais com restrições de terras. De fato, regiões onde existe escassez de terra, outros usos do solo e o custo de aquisição ou arrendamento de terras são mais elevados, sob a ótica de viabilidade econômica, podem ser locais mais apropriados à fotovoltaica flutuante. Como exemplo, há o caso de instalações em açudes em propriedades rurais, destinando a terra à agricultura, ao mesmo tempo em que se gera energia elétrica para a atividade produtiva.

Com um número cada vez maior de parques em operação no mundo, inclusive com alguns projetos de P&D no Brasil, será possível obter dados mais robustos e precisos especialmente sobre a eficiência dos módulos, evaporação e degradação dos módulos fotovoltaicos, e minimizar incertezas relacionadas a custos, complexidades tecnológicas e impactos socioambientais.

Do ponto de vista do planejamento energético, o fato das instalações fotovoltaicas se darem em terra ou em espelhos d'água é indiferente, cabendo aos empreendedores prospectar os projetos mais competitivos, inclusive avaliar ganhos sinérgicos no caso de usinas híbridas.

Dentre os benefícios da FVF, espera-se que os ganhos de eficiência devido à redução da temperatura dos módulos levem a uma produção maior que em instalações em solo em estruturas fixas. Porém, ainda não há clareza sobre os ganhos de produção com a instalação de um solar flutuante no lugar de uma usina solar convencional, sendo apontados ganhos menos expressivos em experimentos recentes no Brasil, especialmente em locais mais úmidos. Além disso, a maioria dos novos projetos em terra considera rastreamento em um eixo, proporcionando ganhos equivalentes ou superiores. A utilização de módulos bifaciais favorece também as instalações em terra, dada a maior reflexão difusa do solo em relação à água.

A adoção de instalações flutuantes em outros países se deu, em muitos casos, por limitações de espaço ou para evitar custos com a aquisição de terras. Na China, houve também um forte movimento de instalação em lagos de minas de carvão desativadas. Dada a elevada disponibilidade de terras no Brasil, a custos baixos nas regiões de melhor irradiação, esse tipo de vantagem fundiária não é tão relevante.

Considerando o maior custo de instalação, o custo da geração das FVF não parece competitivo neste momento. É necessário monitorar se, com o crescimento do número de instalações no mundo, os custos de estrutura serão reduzidos até um nível em que haja

competitividade. Ainda, não foram identificados externalidades positivas ou benefícios em relação aos sistemas fotovoltaicos convencionais que não possam ser capturados com a regulação vigente, nem particularidades das FVF que demandem tratamento diferenciado. Pelas razões citadas, deve-se acompanhar a evolução da tecnologia, permitindo sua competição com as demais, sem a necessidade de introdução de subsídios ou contratações dedicadas

Com o desenvolvimento do mercado no Brasil, ainda que já seja permitida inclusive a participação nos leilões, deve-se buscar eliminar barreiras ao desenvolvimento de usinas flutuantes, por meio de regramentos claros, em especial aqueles ligados ao licenciamento ambiental e uso da área, de forma a promover a competição justa entre as diferentes soluções, levando ao menor custo de geração.

Mostrando-se competitiva, a tecnologia solar flutuante poderia encontrar naturalmente o seu espaço no mercado brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR FILHO, A. A. R.; CARVALHO, P. C. M. D.; DUPONT, I. M. Influência da distância de painéis fotovoltaicos em relação à água sobre a eficiência energética. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.
- ALSOL. Alsol investe em usina solar flutuante com tecnologia 100% nacional, 2019. Disponível em: <<http://alsolenergia.com.br/blog/usina-solar-flutuante/>>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- ALTERNATIVE ENERGY. Floating solar panels: a viable solution?, 25 setembro 2019. Disponível em: <<http://www.alternative-energy-news.info/floating-solar-panels/>>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- AYALA PELAEZ, S. et al. Model and Validation of Single-Axis Tracking With Bifacial PV. **IEEE Journal of Physics**, v. 9, n. 3, p. 715-721, 2019.
- BORBA, R. ; NOVAK, L. H. Sistemas fotovoltaicos flutuantes: aspectos positivos e desafios. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, abril 2018.
- BRASIL. Lei n. 9.433 de 8 de janeiro de 1997, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990.
- BRASIL. Lei n. 9.984 de 17 de julho de 2000, 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9984.htm>. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências.
- BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
- BRIDGE TO INDIA. **Floating solar. Opportunities and way ahead**. [S.l.]. 2018.
- CAZZANIGA, R. et al. Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 1730-1741, 2018.
- CAZZANIGA, R. et al. Integration of PV floating with hydroelectric power plants. **Heliyon**, v. 5, n. 6, Junho 2019.
- CETESB. São Paulo coloca em operação a primeira usina solar flutuante do Brasil, 25 setembro 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/2016/09/29/sao-paulo-coloca-em-operacao-a-primeira-usina-solar-flutuante-do-brasil/>>. Acesso em: 06 set. 2019.
- CHOI, Y. K. A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. **International Journal of Software Engineering and Its Applications**, v. 8, n. 1, p. 75-84, 2014.
- CIEL & TERRE. Anhui cecep: 70,005 kWp. **Ciel et Terre**, 2019. Disponível em: <<https://www.ciel-et-terre.net/project/anhui-cecep-70005-kwp/>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

COSTA, S. G. **Impactes ambientais de sistemas fotovoltaicos flutuantes**. Lisboa. 2017.

DA SILVA, G. D. P. **Large-scale solar photovoltaic impact assessment in the context of the Brazilian environmental and energy planning**. Rio de Janeiro. 2019.

DEMPSTER, T.; TAQUET, M. Fish aggregation device (FAD) research: gaps in current knowledge and future directions for ecological studies. **Reviews in Fish Biology and Fisheries**, v. 14, n. 1, p. 21–42, 2004.

DESSBORN, L.; HESSEL, R.; ELMBERG, J. Geese as vectors of nitrogen and phosphorus to freshwater systems. **Inland Waters**, v. 6, n. 1, p. 111-122, 2016.

DINESH, H.; PEARCE, J. M. The potential of agrivoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 299-308, 2016.

EDP. Painéis Solares flutuantes, 25 setembro 2019. Disponível em: <<https://www.edp.com/pt-pt/paineis-solares-flutuantes>>. Acesso em: 01 jul. 2019.

EPE. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.

EPE. **Plano Nacional de Energia - 2050**. Rio de Janeiro. 2018.

EPE. **Projetos Fotovoltaicos nos Leilões de Energia. Características dos empreendimentos participantes nos leilões de 2013 a 2018**. [S.l.]. 2018.

EPE. Usina Híbridas. Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. (EPE-DEE-NT-011/2018-r0), 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/usinas-hibridas-epe-publica-analise-qualitativa-de-temas-regulatorios-e-comerciais>>.

EPE. **Usinas híbridas no contexto do planejamento energético (EPE-DEE-NT-029/2019-r0)**. [S.l.]. 2019.

EPE. **Projetos Fotovoltaicos nos Leilões de Energia. Análise dos Leilões A-4 e A-6 de 2019**. [S.l.]. 2020.

ESMAP. Energy Sector Management Assistance Program. **Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report**, 25 setembro 2019. Disponível em: <https://esmap.org/where_sun_meets_water_floating_solar_market_report>. Acesso em: 05 set. 2019.

FARFAN, J.; BREYER, C. Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: a virtual battery of great global potential. **Energy Procedia**, 2018. 403-411. 12th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2018.

FERRER-GISBERT, C. et al. A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. **Renewable Energy**, v. 60, p. 63-70, 2013.

FRAUNHOFER ISE. **Fraunhofer ISE Analyzes Potential of Solar Power Plants Located on Pit Lakes in Former Lignite Mines**. Press Release. Freiburg, Alemanha. 2020.

GAIKWAD, O. D.; DESHPANDE, U. L. Evaporation control using floating pv system and canal roof top solar system. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 4, n. 4, p. 214–216, 2017.

GALDINO, M. A. E.; OLIVIERI, M. M. D. A. Considerações sobre a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes no Brasil. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2016.

GTM RESEARCH. **Trends in Solar Technology and System Prices**. [S.l.]. 2018.

GUARNIERI, M. V. **Usinas solares fotovoltaicas com seguimento em um eixo no Brasil: aspectos da construção, custos e expectativa de desempenho**. Dissertação de Mestrado. 2017.

GUGLIOTTI, M. Redução da evaporação em reservatórios por filmes superficiais. **Meio filtrante**, 2 abril 2015. Disponível em: <<http://meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=18208&link=noticias>>. Acesso em: 20 junho 2018.

IDEARI. Visita técnica a usina hidreletrica Sergio Motta, 25 setembro 2019. Disponível em: <<http://ideari.com.br/artigos/visita-tecnica-a-usina-hidreletrica-sergio-motta/>>. Acesso em: 20 maio 2019.

ISIGENERE. <https://www.isifloating.com/>, 2019. Disponível em: <<https://www.isifloating.com/ficha-tecnica-isifloating/>>. Acesso em: 05 setembro 2019.

ITRPV. **International Technology Roadmap for Photovoltaics. 2018 Results**. [S.l.]. 2019.

KOINE MULTIMEDIA. **Koiné Multimedia**, 2019. Disponível em: <<http://www.koinemultimedia.eu/wp/sample-page/>>. Acesso em: 25 setembro 2019.

KOINE MULTIMEDIA. **Koiné Multimedia**, 2019. Disponível em: <<http://www.floating-solar.com/technologies.html>>. Acesso em: 06 setembro 2019.

LOUISE, W. **Optimization of floating PV systems : Case study for a shrimp farm in Thailand**. Västerås. 2017.

MALANDRINO, A. G. et al. **"Bolas de Sombra" - Análise da tecnologia**. [S.l.]. 2015.

MARÇAL, S. F. **Efeito de alterações do nível da água do reservatório Salto Grande, usadas para controle de macrófitas, na estrutura e estabilidade da fauna de invertebrados fitófilos em uma lagoa marginal ao Rio Paranapanema**. [S.l.], p. 135. 2014.

MME; EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. [S.l.]: [s.n.], 2019.

OCEAN SUN. **Ocean Sun**, 2019. Disponível em: <<https://oceansun.no/>>. Acesso em: 05 setembro 2019.

REC. Riding the wave of solar energy: Why floating solar installations are a positive step for energy generation., p. NE-18-27, Rev D.2018, 2018. Disponível em: <https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/wp_-_floating_pv_rev_d_web.pdf>.

REINDL, T. **World's Largest Floating Solar Testbed - Overview & Findings**. SERIS. Manila. 2018.

ROSA-CLOT, M.; TINA, G. M.; NIZETIC, S. Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project. **Procedia Engineering**, 2017. 664-674. 9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings.

SACRAMENTO, E. M. D. et al. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. **IET Renewable Power Generation**, November 2015.

SAHU, A.; YADAV, N.; SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 815-824, 2016.

SANTAFÉ, M. R. et al. Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs. **Energy**, v. vol. 67, p. p. 246-255, 2014.

SCOTRA. **Floating PV System**, 2019. Disponível em: <<http://scotra.co.kr>>. Acesso em: 05 setembro 2019.

SECI. **Expression of Interest (EOI) for development of about 10,000 MW Floating Solar PV (FSPV) Projects on Build, Own & Operate basis**. New Delhi. 2017.

SINGH, A. K. et al. Feasibility study of a grid-tied 2MW floating solar PV power station and e-transportation facility using 'SketchUp Pro' for the proposed smart city of Pondicherry in India. **Journal of Smart Cities**, v. 2, p. 49–59, 2016.

SOBRAL, M. R. R. **Avaliação do potencial fotovoltaico flutuante em Portugal**. [S.l.]. 2018.

SOLARISFLOAT. **SolarisFloat**, 2019. Disponível em: <<https://www.solarisfloat.com>>. Acesso em: 13 setembro 2019.

SPENCER, R. S. et al. Floating Photovoltaic Systems: Assessing the Technical Potential of Photovoltaic Systems on Man-Made Water Bodies in the Continental United States. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 3, p. 1680-1689, 2019.

STRANGUETO, K. M. **Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica através de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Reservatórios de Hidroelétricas**. Universidade Estadual de Campinas. [S.l.]. 2016.

SUNLUTION, 2019. Disponível em: <<https://www.sunlution.com.br/>>. Acesso em: 05 setembro 2019.

SUNLUTION. Fazenda Figueiredo – Goiás, 2019. Disponível em: <<https://www.sunlution.com.br/portfolio-items/fazenda-figueiredo-go/>>. Acesso em: 07 outubro 2019.

TABOADA, M. E. et al. Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. **Renewable Energy**, n. 105, 2017. 601-615.

TRAPANI, K.; SANTAFÉ, M. R. A review of floating photovoltaic installations: 2007– 2013. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 23, n. 4, p. 524–532, 2014.

VERA Y CONDE, C. F.; ROCHA, C. F. D. Distúrbio no habitat e riqueza e diversidade de pequenos mamíferos em uma área de Mata Atlântica no sudeste do Brasil. **Braz. J. Biol.**, v. 66, n. 4, p. 983-990, 2006.

WOOD MACKENZIE. **The Economics of Floating Solar**. [S.l.]. 2019.

WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP. **Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report**. [S.l.]. 2019.